青藏铁路沱沱河段取土场草本根系力学强度试验

周林虎[1]， 徐志闻[1]， 周国英[2]， 胡夏嵩[1,3]， 许 桐[1]， 申紫雁[1]， 刘昌义[1]

(1. 青海大学地质工程系，青海 西宁 810016；2. 中国科学院西北高原生物研究所，青海 西宁 810008；3. 中国科学院青海盐湖研究所，中国科学院盐湖资源综合高效利用重点实验室，青海 西宁 810008)

摘 要： 以青藏铁路沱沱河段取土场作为研究区，选取生长年限为10 a的碱茅[*Puccinellia distans* (Linn.) Parl.]、垂穗披碱草(*Elymus nutans* Griseb.)、冷地早熟禾(*Poa crymophila* L.)和星星草[*Puccinellia tenuiflora* (Griseb.) Scribn.] 4种草本作为试验供试种，分别进行室内单根拉伸与剪切试验，较为系统地评价了4种草本其单根力学强度特征。结果表明：(1) 取土场4种草本单根平均抗拉强度由大至小为：碱茅(66.29 MPa)>垂穗披碱草(50.78 MPa)>冷地早熟禾(46.11 MPa)>星星草(40.62 MPa)，单根平均抗剪强度由大至小为：碱茅(44.37 MPa)>垂穗披碱草(37.74 MPa)>冷地早熟禾(36.80 MPa)>星星草(26.66 MPa)，且两者均与根径之间符合幂函数负相关关系；(2) 对生长年限为5 a和10 a的4种草本单根抗拉力和抗剪力对比分析得出，4种草本根系抗拉力增长幅度为11.71%~62.31%，抗剪力增长幅度为26.30%~92.61%；(3) 比较4种草本根系其不同根径级别的力学强度，得出碱茅和垂穗披碱草根系力学性能相对优于其他2种草本，可优先作为研究区固土护坡植物种。本研究可为青藏铁路沱沱河段及周边优势护坡植物的筛选提供一定理论依据。

关键词： 青藏铁路；沱沱河；取土场；草本植物；抗拉强度；抗剪强度

青藏铁路沿线生态环境和生物多样性具有敏感性、原始性和脆弱性等特点[1-4]，植被破坏后难以恢复，其结果会加剧高原草地退化和水土流失、土地沙化、黑土滩、影响野生动物觅食和高原生态景观破碎化等问题[5-9]。因此，如何科学有效地保护和恢复地表植被，防止或减少冻土退化以及土地荒漠化等现象，有针对性地开展高寒脆弱生态区植被恢复技术方面的研究具有重要理论价值和实际意义。

有关青藏铁路沿线取土场和路基边坡植物护坡方面，国内外学者开展了大量研究[10-19]。魏建方等[15-16]对沱沱河路段取土场和路基边坡采取人工植被重建的方法，通过统计植物发芽率、植株高度、植被盖度和群落生物量等指标，指出早熟禾(*Poa crymophila* L.)和披碱草(*Elymus nutans* Griseb.)能较好地适应高寒草原的取土场环境。陈桂琛等[17-18]在青藏铁路沱沱河试验段高寒草原区取土场开展植被恢复试验研究，指出梭罗草[*Kengyilia thoroldiana* (Oliv.) Keng]、垂穗披碱草(*Elymus nutans* Griseb.)等乡土植物，表现出对青藏铁路沿线高寒干旱区气候和土壤环境具有较好适应性，结合相应的植被恢复技术措施，对青藏铁路取土场次生裸地植被的快速恢复是可行而有效的。朱勇等[19]通过对种植于青藏铁路当雄至羊八井段路基边坡的5种耐寒、耐旱的草本其越冬率和盖度进行统计，指出该路段护坡植物首选垂穗披碱草(*Elymus nutans* Griseb.)。任康等[20]对青藏铁路沿线不同植被恢复模式下植物地上生物量、植被恢复情况、土壤物理性质和化学性质指标进行对比，指出在干旱缺水的碱性土壤中进行植被恢复采用株型较为矮小的灌木林效果更佳。上述相关研究表明，关于青藏铁路沿线植被恢复的研究主要集中在采用种植一些耐寒、耐旱和耐风沙的植物，通过对其出苗率、越冬率、覆盖度和生物量等指标进行统计，进而来评价该种植物对植被恢复的效果和贡献。该种方法能通过比较一些植物生长指标来评价其固土护坡贡献，进而筛选出适宜于该地区生长的植物；相比较而言，通过对比植物根系

收稿日期： 2019－09－11； **修订日期：** 2019－12－25

基金项目： 第二次青藏高原综合考察研究(2019QZKK0805)；国家自然科学基金资助项目(41572306)；中国科学院“百人计划”资助项目(Y110091025)；青海省自然科学基金资助项目(2014-ZJ-906)

作者简介： 周林虎(1995-)，男，硕士研究生，主要从事地质工程方面的研究工作. E-mail: 18997295192@163.com

通讯作者： 胡夏嵩. E-mail: huxiasong@tsinghua.org.cn

力学强度来筛选优势固土护坡植物种方面的研究较为缺乏，而植物根系抗拉力和抗剪力可作为评价植物固土护坡作用和增强边坡稳定性的2个重要指标[21-23]。

植物根系增强土体抗剪强度、防治水土流失以及提高边坡稳定性等方面研究，得到了国内外学者[22-32]的普遍关注，对植物根系的力学特性研究亦引起诸多学者的关注。植被护坡技术除恢复生态、改良土壤和美化景观外，还具有水土保持、防治滑坡和泥石流等灾害的作用。基于此，通过确定区内草本植物筛选原则，即能适宜于高海拔、寒冷和干旱的环境条件，且其出苗率高，越冬性好，覆盖度高；其次，植物根系具有较强抗拉和抗剪强度，且对土体强度具有显著的增强作用，能有效防治水土流失和提高边坡稳定性。通过种植适宜于青藏铁路沱沱河段取土场的4种草本，开展生长期限为5 a和10 a的植物其根系力学强度试验，进一步探讨不同生长年限条件下植物所具有的根系力学特性的变化；同时从根系力学强度角度，筛选出具有显著固土护坡作用的优势草本植物种。本研究对于进一步开展青藏铁路沿线取土场和路基边坡植被恢复，具有理论研究价值和实际指导意义。

1　试验区概况

试验区位于青海省格尔木市唐古拉镇以北10 km处青藏铁路路基开挖形成的取土场(图1)，平均海拔为4560 m，地处沱沱河北岸冲积、洪积平原，地形开阔且略有起伏；地层主要为第四系全新统粉质黏土、细砂、砾砂、圆砾土以及新近系、古近系互层状泥岩、砂岩[33]；植物种植区为多年冻土向沱沱河融区过渡地带，主要表现为岛状多年冻土与融区交错分布，融区主要分布于部位较高、排水条件良好、土层较干燥的低缓丘陵[17]。区内气候类型为高原大陆性气候，具有寒冷、多风、干旱的特点[34]。根据沱沱河气象观测站的相关资料，该区年平均气温为-4.2 ℃，最低温度为-45.2 ℃，最高温度为24.7 ℃，年平均降水量为275.6 mm，年平均蒸发量为1638.9 mm，年平均大风日数为146 d[35]。

2　材料与方法

2.1　试验材料

根据植物种植区高海拔和寒冷干旱的气候特点，选取具有抗寒耐旱、抗风沙、耐盐碱等特性的4种优势乡土草本植物：碱茅[*Puccinellia distans* (Linn.) Parl.]、垂穗披碱草(*Elymus nutans* Griseb.)、冷地早熟禾(*Poa crymophila* L.)和星星草[*Puccinellia tenuiflora* (Griseb.) Scribn.]，种植区经过地表适度平整、表层翻耕、磨耙开沟，种子播种、磨耙覆土镇压等过程[34]。

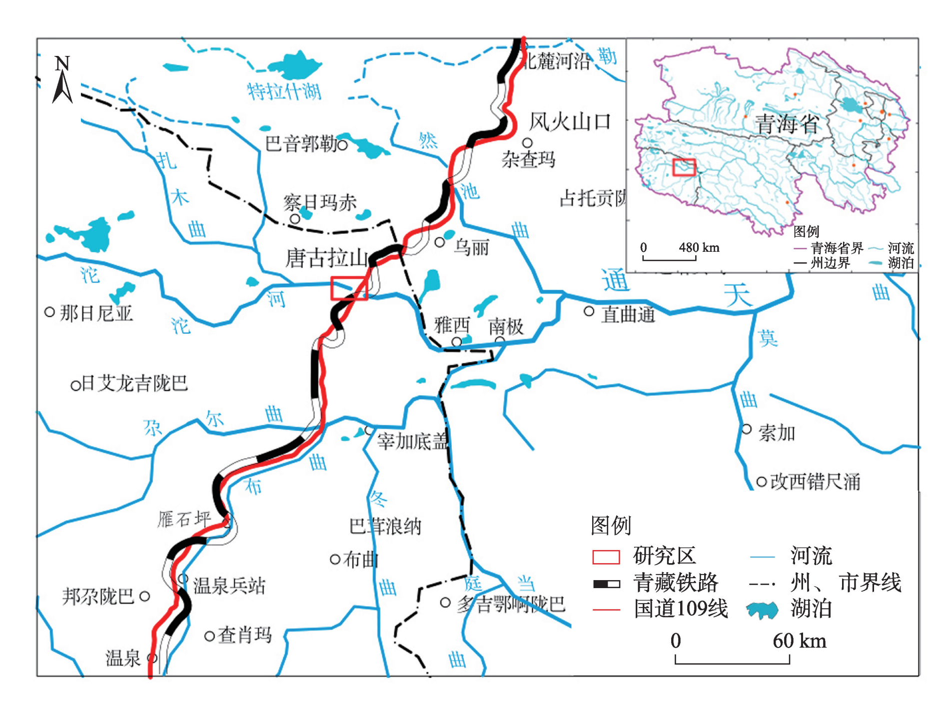


图1　研究区位置示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the study area

2.2 试验装置

4种草本植物根系的室内单根拉伸与剪切试验,采用HY-0580型微机控制电子万能材料试验机。该试验机主要由数据采集系统和工作系统组成(图2)[36]。通过数据采集系统记录整个单根拉伸或剪切过程中植物单根抗拉力或抗剪力随时间的变化情况(图3),同时记录单根位移以及单根破坏时的最大抗拉力(抗剪力)。

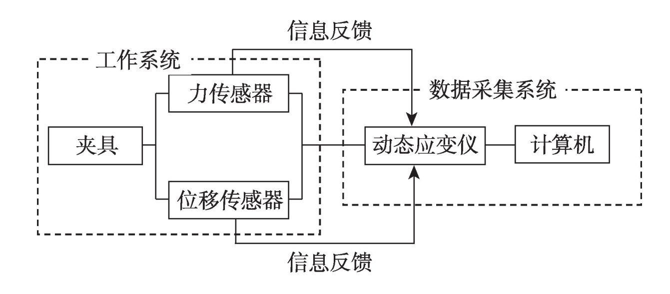


图2 植物单根拉伸与剪切试验仪器工作原理

Fig. 2 Working principle of single root tensile and shear tester

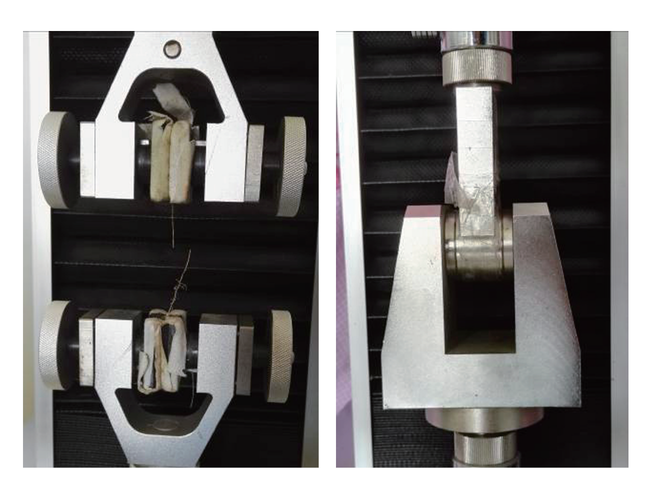


图3 单根拉伸和单根剪切试验过程

Fig. 3 Process of single tensile and single shear test

2.3 试验方法

在进行单根拉伸与剪切试验过程中,将根系完整的整株植物挖掘出,移入直径为28 cm,高度为22 cm的试样盆内且按植物种进行编号,同时将试样盆及时带回试验室开展单根拉伸和剪切试验。在进行试验之前,将根-土复合体中的土体部分用清水冲洗干净后截取根长为10~15 cm,且表皮完整新鲜的根段,每种草本选取50~60个根段作为1组,然后分别进行单根拉伸与剪切试验。

草本植物单根拉伸试验的步骤:试验之前采用游标卡尺对选定的夹具之间受拉伸的5 cm根段依次测量其上、中、下3个位置处根径,取其平均值作为受拉伸根段的根径并记录,然后将试验根段夹持在工作台上、下两个拉伸夹具之间,两夹具之间标距设置为5 cm,同时保持夹具之间根段顺直且在拉伸试验开始前尽量不受拉力影响,启动试验电机以20 mm·min^{-1}的速率带动拉伸夹具移动[37],直至试样根段被拉断为止,整个拉伸试验过程中系统将自动记录试样拉伸变形与所受到的拉力。此外,在试验过程中为避免试验根段在两个夹具位置处发生打滑现象,采用在夹具两端粘贴橡胶块、缠绕和添加柔性物质等方法,以有效增加根与夹具之间的摩擦[38];与此同时,为了提高试验数据的合理性,适当增加试验次数以及选取单根拉伸试验过程中,断裂破坏发生在根段试样中部处的试验结果作为有效试验结果。

单根抗拉强度计算公式为:

$$T=\frac{4F}{\pi D^2} \tag{1}$$

式中:T为根段抗拉强度(MPa);F为根段最大抗拉力(N);D为根段平均根径(mm)。

草本植物单根剪切试验步骤:试验之前采用游标卡尺测量根段剪切试样3个位置处根径,取其平均值作为试样根径并记录,然后将试验根段放置于工作台的剪切夹具中,启动试验电机以20 mm·min^{-1}的速率进行剪切试验,直至试样剪断停止试验。单根剪切试验过程中,试验系统将自动记录单根试样在剪切过程中的位移与抗剪力大小。

单根抗剪强度计算公式为:

$$\tau_b=\frac{F_b}{2A}=\frac{2F_b}{\pi D^2} \tag{2}$$

式中:τ_b为根段的抗剪强度(MPa);F_b为根段最大抗剪力(N);A为根段剪切试验前的原始截面积(mm^2);D为根段平均直径(mm)。

为进一步研究4种草本植物在不同生长年限时其根系力学强度及其变化特征,将生长期限为5 a和10 a的草本植物其单根抗拉和抗剪试验结果进行对比,并通过计算4种草本单根抗拉力和抗剪力增长幅度的方法,来定量评价区内2种不同生长年限条件下4种草本根系力学特性及其变化特征。

3 结果分析

3.1 草本植物单根抗拉强度特征

由表1可知,在不同根径级别条件下,碱茅单根

表1 4种草本植物单根抗拉试验结果

Tab. 1 Results of single root tensile test results of four herbs

根径级别/mm	单根抗拉力/N				单根抗拉强度/MPa			
	碱茅	垂穗披碱草	冷地早熟禾	星星草	碱茅	垂穗披肩草	冷地早熟禾	星星草
$0.1\leqslant D<0.2$	2.72±0.29	2.13±0.29	1.80±0.16	1.399±0.24	141.16±23.53	96.43±19.02	91.58±22.05	74.79±17.27
$0.2\leqslant D<0.3$	3.70±0.46	2.84±0.38	2.63±0.30	2.40±0.33	77.74±10.27	59.61±8.86	59.73±9.18	50.37±8.77
$0.3\leqslant D<0.4$	5.17±0.53	4.64±0.38	3.87±0.37	3.27±0.31	56.13±4.86	49.86±4.65	41.29±5.24	36.31±4.16
$0.4\leqslant D<0.5$	7.00±0.77	5.92±0.63	5.24±0.33	4.59±0.52	44.54±2.22	38.24±2.43	33.65±4.36	28.52±1.46
$0.5\leqslant D<0.6$	8.79±0.76	8.36±0.69	6.66±0.40	6.01±0.45	40.64±0.85	35.77±1.60	29.82±1.50	27.24±0.75

注:数据为平均值±标准差。

抗拉力和抗拉强度均大于其他3种草本,垂穗披碱草和冷地早熟禾次之,星星草相对最小。在根径为0.1~0.6 mm时,碱茅单根平均抗拉力为垂穗披碱草、冷地早熟禾和星星草的1.13、1.25倍和1.51倍,其单根平均抗拉强度为垂穗披碱草、冷地早熟禾和星星草的1.31、1.44倍和1.63倍。

由图4和图5可知,单根抗拉力及其增幅随根径增加呈不断增大趋势,单根抗拉强度及其降幅则随根径增大呈减小趋势。由表2可知,4种草本单根抗拉力与其根径之间呈指数函数关系,单根抗拉强度与根径之间呈幂函数关系,拟合优度均达到0.9以上,呈现出显著的拟合效果,且显著性水平均小于0.01,表现出极相关性。该结果与刘亚斌[23]、刘昌义[29]、蒋坤云[30]等对植物根系抗拉强度与根径之间关系的研究结果表现出一致规律。

3.2 草本植物单根抗剪强度特征

由表3可知,碱茅单根抗剪力和抗剪强度亦最大,垂穗披碱草和冷地早熟禾次之,星星草最小,这与其单根抗拉力和抗拉强度大小表现出一致性规律。在根径为0.1~0.6 mm时,碱茅、垂穗披碱草、冷

图4 4种草本单根抗拉力与根径之间关系

Fig. 4 Relationship between single root tensile force and root diameter of four herbs

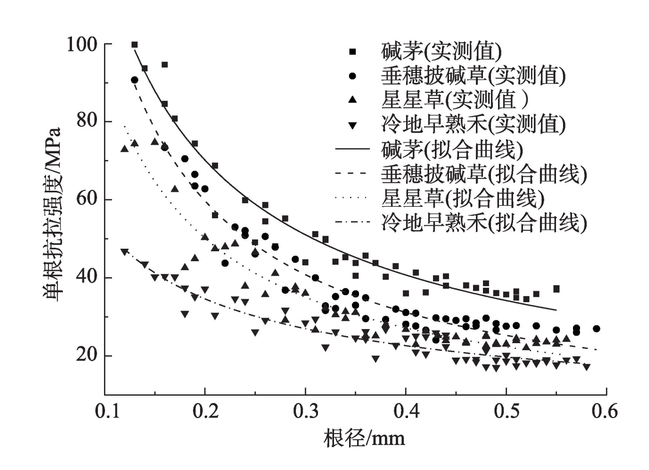


图5 4种草本单根抗拉强度与根径之间关系

Fig. 5 Relationship between single root tensile strength and root diameter of four herbs

表2 4种草本植物单根抗拉力和抗拉强度与根径拟合方程

Tab. 2 Fitting equations of single root shear force and shear strength and root diameter of four herbs

植物	单根抗拉力与根径拟合方程	拟合优度 R^2	显著性水平 P	单根抗拉强度与根径拟合方程	拟合优度 R^2	显著性水平 P
碱茅	$F=1.72e^{3.13D}$	0.9866	**	$P=17.19D^{-1.12}$	0.9791	**
垂穗披碱草	$F=1.36e^{3.32D}$	0.9735	**	$P=18.19D^{-0.91}$	0.9438	**
冷地早熟禾	$F=1.29e^{3.07D}$	0.9573	**	$P=14.33D^{-1.01}$	0.9740	**
星星草	$F=0.98e^{3.43D}$	0.9787	**	$P=14.20D^{-0.89}$	0.9418	**

注:**表示显著性水平 $P<0.01$。

表3 4种草本植物单根剪切试验结果

Tab. 3 Results of single root shear test results of four herbs

根径级别/mm	单根抗剪力/N				单根抗剪强度/MPa			
	碱茅	垂穗披碱草	星星草	冷地早熟禾	碱茅	垂穗披肩草	星星草	冷地早熟禾
$0.1\leq D<0.2$	3.75±0.25	2.86±0.30	1.60±0.31	3.11±0.33	90.66±14.18	77.45±14.18	42.22±8.25	69.25±8.68
$0.2\leq D<0.3$	5.09±0.63	4.49±0.56	2.87±0.60	4.38±0.50	55.68±8.53	47.76±5.80	30.32±3.52	47.08±7.51
$0.3\leq D<0.4$	7.51±1.02	6.63±0.74	4.49±0.68	6.05±0.69	39.62±2.23	34.52±3.76	22.87±2.38	32.19±3.45
$0.4\leq D<0.5$	9.88±1.21	9.03±1.01	6.56±0.86	8.06±0.91	31.32±2.35	28.39±1.68	21.11±1.36	25.72±1.60
$0.5\leq D<0.6$	12.47±1.21	12.00±1.22	9.12±0.97	10.47±0.93	30.26±2.17	26.67±1.71	20.61±0.79	23.07±1.30

注:数据为平均值±标准差。

地早熟禾和星星草单根平均抗剪力为7.82 N、7.63 N、4.89 N和6.76 N,单根平均抗剪强度为44.37 MPa、37.74 MPa、36.80 MPa和26.66 MPa。

此外,4种草本单根抗剪力表现出随根径增加而增大的变化趋势(图6),且其抗剪力与根径之间符合指数函数关系(表4);相应地,4种草本其平均单根抗剪强度均表现出随根径增加而减小的变化趋势(图7),且其抗剪强度与根径之间符合幂函数关系(表4)。该结果与贺振昭等[22]对植物根系单根抗剪试验结果相一致。

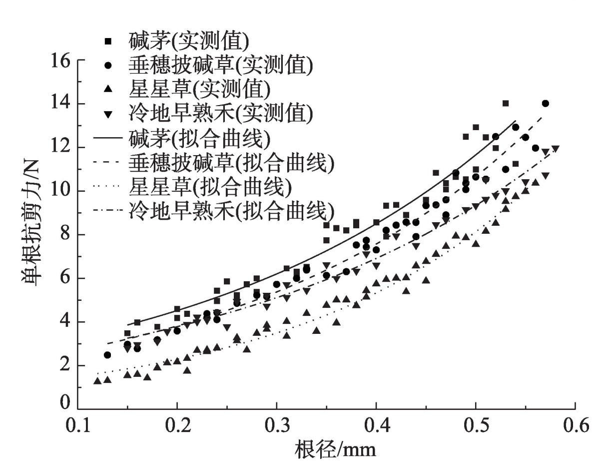


图6 4种草本单根抗剪力与根径之间关系

Fig. 6 Relationship between single root shear force and root diameter of four herbs

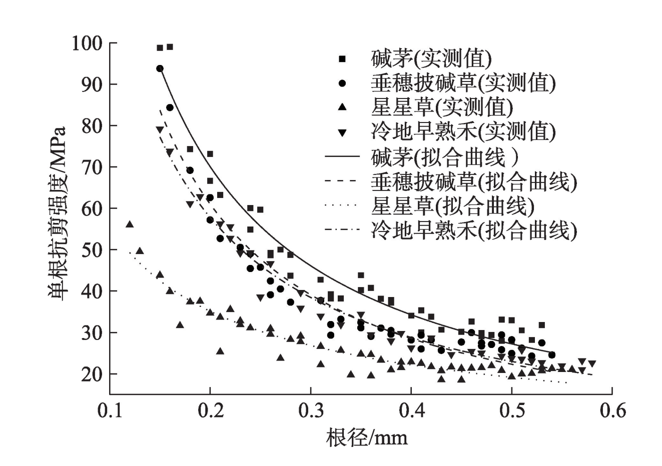


图7 4种草本单根抗剪强度与根径之间关系

Fig. 7 Relationship between root diameter and single root shear strength of four herbs

3.3 单根平均抗拉力、平均抗剪力随生长期变化特征

3.3.1 单根平均抗拉力随生长年限变化特征 4种草本植物其生长年限为5 a时,由室内单根拉伸试验结果得到其单根平均抗拉力值分别为碱茅(3.45 N),垂穗披碱草(4.44 N),冷地早熟禾(3.77 N),星星草(2.99 N)[34];生长年限为10 a时,4种草本平均单根抗拉力分别为5.60 N、4.96 N、4.48 N、3.72 N,与生长期为5 a相比其单根平均抗拉力增加幅度分别

表4 4种草本植物单根抗力和抗拉强度与根径拟合方程

Tab. 4 Fitting equations of single root tensile force and tensile strength and root diameter of four herbs

植物名称	单根抗剪力与根径拟合方程	拟合优度R^2	显著性水平P	单根抗剪强度与根径拟合方程	拟合优度R^2	显著性水平P
碱茅	$F_b=2.41e^{3.15D}$	0.9497	**	$\tau_b=13.32D^{-1.03}$	0.9516	**
垂穗披肩草	$F_b=1.93e^{3.42D}$	0.9772	**	$\tau_b=10.42D^{-1.10}$	0.9355	**
星星草	$F_b=0.99e^{3.421D}$	0.9812	**	$\tau_b=12.10D^{-0.66}$	0.8899	**
冷地早熟禾	$F_b=2.08e^{3.01D}$	0.9822	**	$\tau_b=11.44D^{-1.01}$	0.9777	**

注:**表示显著性水平$P<0.01$。

表5 4种草本植物不同生长年限单根平均抗拉力、抗剪力值对比

Tab. 5 Comparison results of average tensile force and shear force of single root of four herbs at different growth stages

植物	不同生长期单根平均抗拉力/N		单根平均抗拉力增加幅度/%	不同生长期单根平均抗剪力/N		单根平均抗剪力增加幅度/%
	5 a	10 a		5 a	10 a	
碱茅	3.45	5.60	62.32	4.06	7.82	92.61
垂穗披碱草	4.44	4.96	11.71	4.33	7.63	76.21
冷地早熟禾	3.77	4.48	18.83	4.16	6.76	62.50
星星草	2.99	3.72	24.41	3.87	4.89	26.30

为62.32%、11.71%、18.83%和24.41%(表5)。

3.3.2 单根平均抗剪力随生长年限变化特征 4种草本植物生长年限为5 a时,其单根平均抗剪力值分别为:碱茅(4.06 N),垂穗披碱草(4.33 N),冷地早熟禾(4.16 N),星星草(3.87 N)[34];生长年限为10 a时,4种草本其单根平均抗剪力分别为7.82 N、7.63 N、6.76 N和4.89 N,与生长年限为5 a时相比,其单根平均抗剪力增加幅度分别为92.61%、76.21%、62.50%、26.36%(表5)。

通过以上分析可知,生长年限为5 a时,垂穗披碱草单根抗拉力和抗剪力均显著于其他3种草本,一定程度说明在该生长年限条件下,垂穗披碱草具有相对较为显著的固土护坡性能;而当生长年限为10 a时,碱茅单根抗拉力和抗剪力均得到了显著提升,这说明随着生长年限增加,碱茅根系固土护坡、防治水土流失的作用相对较为显著。此外,随着生长年限增加,4种草本植物单根抗剪性能较抗拉性能相对得到更为显著提升,这一定程度说明了草本根系承受横向荷载的能力亦有所加强。

4 结 论

(1) 沱沱河段取土场试验区4种草本植物,单根平均抗拉强度由大至小为:碱茅(66.29 MPa)>垂穗披碱草(50.78 MPa)>冷地早熟禾(46.11 MPa)>星星草(40.62 MPa),且其与根径符合幂函数负相关关系。

(2) 单根平均抗剪强度由大至小为:碱茅(44.37 MPa)>垂穗披碱草(37.74 MPa)>冷地早熟禾(36.80 MPa)>星星草(26.66 MPa),且其与根径符合幂函数负相关关系。

(3) 通过对生长年限为5 a和10 a的4种草本单根抗拉力和抗剪力对比分析得出,根系抗拉力增长幅度为11.71%~62.31%,抗剪力增长幅度为26.30%~92.61%,其中碱茅单根抗拉力和抗剪力增长幅度最高,分别为62.31%和92.61%。

(4) 分析生长年限为10 a的4种草本单根力学特性,得出碱茅、垂穗披碱草根系抗拉力、抗拉强度、抗剪力和抗剪强度均优于其他2种草本,且随着生长年限增加,碱茅和垂穗披碱草相对更能体现出其固土护坡的显著性。

参考文献(References):

[1] 王小丹, 钟祥浩, 刘淑珍, 等. 西藏高原生态功能区划研究[J]. 地理科学, 2009, 29(5): 715-720. [Wang Xiaodan, Zhong Xianghao, Liu Shuzhen, et al. Ecological function regionalization of Tibetan Plateau[J]. Scientia Geographica Sinica, 2009, 29(5): 715-720.]

[2] 于伯华, 吕昌河. 青藏高原高寒区生态脆弱性评价[J]. 地理研究, 2011, 30(12): 2289-2295. [Yu Bohua, Lyu Changhe. Assessment of ecological vulnerability on the Tibetan Plateau[J]. Geographical Research, 2011, 30(12): 2289-2295.]

[3] 席新林, 许兆义. 青藏铁路建设中生态环境保护措施[J]. 环境科学与技术, 2005, 28(增刊2): 119-121. [Xi Zhaolin, Xu Zhaoyi. Eeologieal environment proeteion in the construetion of Qinghai-Tibet Railway[J]. Environmental Science & Technology, 2005, 28 (Suppl. 2): 119-121.]

[4] 张克存, 牛清河, 屈建军, 等. 青藏铁路沱沱河路段流场特征及沙害形成机理[J]. 干旱区研究, 2010, 27(2): 303-308. [Zhang Kecun, Niu Qinghe, Qu Jianjun, et al. Study on the characteristics of flow field and the mechanism of wind-blown sand disasters in the Tuotuohe region along the Qinghai-Tibet Railway[J]. Arid Zone Research, 2010, 27(2): 303-308.]

[5] 胡宜刚, 李睿, 辛玉琴, 等. 青藏铁路植被恢复和"黑土型"退化草地治理的实践与启示[J]. 草业科学, 2015, 32(9): 1413-1422. [Hu Yigang, Li Rui, Xin Yuqing, et al. Management and restoration of degradation vegetation on the Tibetan Plateau[J]. Pratacultural Science, 2015, 32(9): 1413-1422.]

[6] 呈昊. 青藏铁路格(尔木)唐(古拉山)段建设生态保护及植被恢复技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009. [Chen Hao. Study of Ecological Protection and Vegetation Restoration Technology at Ge-Tang Section of Qingzang Railway[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009.]

[7] Cheng J J, Xue C X. The sand-damage-prevention engineering sys-

tem for the railway in the desert region of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2014, 125: 30–37.

[8] Lin Z, Luo J, Niu F. Development of a thermokarst lake and its thermal effects on permafrost over nearly 10 yr in the Beiluhe Basin, Qinghai-Tibet Plateau[J]. Geosphere, 2016, 12(2): 632–643.

[9] 王亚茹, 赵雪雁, 张钦, 等. 高寒生态脆弱区农户的气候变化适应策略——以甘南高原为例[J]. 生态学报, 2017, 37(7): 2392–2402. [Wang Yaru, Zhao Xueyan, Zhang Qin, et al. The evaluation of famers' climate change adaptation strategies in high-frigid ecological vulnerable region: A case of Gannan Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(7): 2392–2402.]

[10] 孙永宁, 王进昌, 韩庆杰, 等. 青藏铁路格尔木至安多段沿线高寒植被、土壤特性与人工植被恢复研究[J]. 中国沙漠, 2011, 31(4): 894–905. [Sun Yongning, Wang Jinchang, Han Qingjie, et al. The alpine vegetation and soil characters and vegetation recovery along the Golmud-Anduo section of the Qinghai-Tibet Railway[J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(4): 894–905.]

[11] 宋怡, 金龙, 陈建兵. 青藏公路工程活动对沿线植被覆盖的影响[J]. 冰川冻土, 2014, 36(4): 1017–1025. [Song Yi, Jin Long, Chen Jianbing. Study of the vegetation change due to the reinforcement and rebuilding along the Qinghai-Tibet Highway[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(4): 1017–1025.]

[12] 罗久富, 郑景明, 周金星, 等. 青藏高原高寒草甸区铁路工程迹地植被恢复过程的种间关联性[J]. 生态学报, 2016, 36(20): 6528–6537. [Luo Jiufu, Zheng Jingming, Zhou Jinxing, et al. Analysis of the interspecific associations present in an alpine meadow community undergoing revegetation on the railway-construction affected land of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(20): 6528–6537.]

[13] Wang G, Gillespie A R, Liang S, et al. Effect of the Qinghai-Tibet Railway on vegetation abundance[J]. International Journal of Remote Sensing, 2015, 36(19–20): 5222–5238.]

[14] 沈渭寿, 张慧, 邹长新, 等. 青藏铁路建设对沿线高寒生态系统的影响及恢复预测方法研究[J]. 科学通报, 2004, 49(9): 909–914. [Shen Weishou, Zhang Hui, Zou Changxin, et al. Study on the effect of Qinghai-Tibet Railway construction on the alpine ecosystem along the line and the method of recovery and prediction[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(9): 909–914.]

[15] 魏建方. 基于青藏铁路建设影响高寒植被再造技术的研究[D]. 重庆: 西南交通大学, 2005. [Wei Jianfang. During Qinghai-Tibet Railway Construction the Research of Revegetation Technology[D]. Chongqing: Southwest Communications University, 2005.]

[16] 魏建方. 青藏铁路建设中高寒草原植被恢复与再造技术的研究[J]. 冰川冻土, 2003, 25(增刊 1): 195–198. [Wei Jianfang. Study of vegetation restoration and revegetation during the constructing of the Qinghai-Tibet Railway[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(Suppl. 1): 195–198.]

[17] 陈桂琛, 周国英, 孙菁, 等. 梭罗草在青藏铁路取土场植被恢复中的应用研究[J]. 冰川冻土, 2006, 28(4): 506–511. [Chen Guichen, Zhou Guoying, Sun Jing, et al. Application of *Kengyilia* to vegetation restoration in gravel soil taken field along the Qinghai-Tibet Railway[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(4): 506–511.]

[18] 陈桂琛, 周国英, 孙菁, 等. 采用垂穗披碱草恢复青藏铁路取土场植被的试验研究[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(5): 134–137. [Chen Guichen, Zhou Guoying, Sun Jing, et al. Test study on the application of *Elymus nutans* to the vegetation restoration in the gravel-soil-taken field along Qinghai-Tibet Railway[J]. China Railway Science, 2008, 29(5): 134–137.]

[19] 朱勇, 呼天明, 王佺珍, 等. 青藏铁路当雄至羊八井段路基边坡植被护坡研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(6): 2424–2425. [Zhu Yong, Hu Tianming, Wang Quanzhen, et al. Slope protection of the Qinghai-Tibet Railway by the way of planting vegetation[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(6): 2424–2425.]

[20] 任康, 郭坤, 郑景明, 等. 青藏铁路西格段沿线不同植被恢复模式的生态效益[J]. 生态学杂志, 2019, 38(3): 627–636. [Ren Kang, Guo Kun, Zheng Jingming, et al. Ecological benefits of different vegetation restoration modes along the Xining to Golmud section of Qinghai-Tibet Railway[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(3): 627–636.]

[21] 周林虎, 刘昌义, 胡夏嵩, 等. 寒旱区4种草本根系力学特性试验研究[J]. 人民黄河, 2019, 41(5): 90–95. [Zhou Linhu, Liu Changyi, Hu Xiasong, et al. Experimental study on the mechanical properties of four herbs roots in cold-arid area[J]. Yellow River, 2019, 41(5): 90–95.]

[22] 贺振昭, 党生, 刘昌义, 等. 青海湖地区草本植物根系力学特性试验研究[J]. 中国水土保持, 2017(4): 44–48, 69. [He Zhenzhao, Dang Sheng, Liu Changyi, et al. Experimental study on mechanical characteristics of herbaceous root system of the Qinghai Lake area[J]. Soil and Water Conservation in China, 2017(4): 44–48, 69.]

[23] 刘亚斌, 李淑霞, 余冬梅, 等. 西宁盆地黄土区典型草本植物单根抗拉力学特性试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(15): 157–166. [Liu Yabin, Li Shuxia, Yu Dongmei, et al. Experiment on single root tensile mechanical properties of typical herb species in loess region of Xining Basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(15): 157–166.]

[24] Yan Z X, Song Y, Jiang P, et al. Mechanical analysis of interaction between plant roots and rock and soil mass in slope vegetation[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2010, 31(5): 617–622.

[25] Genet M, Stokes A, Salin F, et al. The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots[J]. Plant & Soil, 2005, 278(1–2): 1–9.

[26] Zhang C B, Zhou X, Jiang J, et al. Root moisture content influence on root tensile tests of herbaceous plants[J]. Catena, 2018, 172: 140–147.

[27] Cazzuffi O, Cardile G, Gioffrè D. Geosynthetic engineering and vegetation growth in soil reinforcement applications[J]. Transporta-

tion Infrastructure Geotechnology, 2014, 1(3-4): 262-300.

[28] 左志严, 格日乐, 乌仁图雅, 等. 内蒙古中西部3种乡土植物根系抗拉力学特性的对比研究[J]. 水土保持通报, 2015, 35(2): 52-57. [Zuo Zhiyan, Gerile, Wurentuya, et al. Root tensile mechanism comparison of three aboriginal plants in central-western Inner Mongolia area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(2): 52-57.]

[29] 刘昌义, 胡夏嵩, 赵玉娇, 等. 寒旱环境草本与灌木植物单根拉伸试验强度特征研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(1): 1-10. [Liu Changyi, Hu Xiasong, Zhao Yujiao, et al. Strength characteristics of single root tensile test of herbs and shrubs in cold and arid environments[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(1): 1-10.]

[30] 蒋坤云. 植物根系抗拉特性的单根微观结构作用机制[D]. 北京: 北京林业大学, 2013. [Jiang Kunyun. Mechanism of the Microstructure of A Single Rroot to the Tensile Properties of Plant Root System[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013]

[31] 郭京衡, 李尝君, 曾凡江, 等. 2种荒漠植物根系生物量分布与土壤水分、养分的关系[J]. 干旱区研究, 2016, 33(1): 166-171. [Guo Jingheng, Li Changjun, Zeng Fanjiang, et al. Relationship between root biomass distribution and soil moisture, nutrient for two desert plant species[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(1): 166-171.]

[32] 陈亚宁, 李卫红, 陈亚鹏, 等. 荒漠河岸林建群植物的水分利用过程分析[J]. 干旱区研究, 2018, 35(1): 130-136. [Chen Yaning, Li Weihong, Cheng Yapeng, et al. Water use process of constructive plants in desert riparian forest[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(1): 130-136.]

[33] 李乐意. 青藏高原古近纪沱沱河盆地磁性地层及其古环境演变[D]. 西安: 中国科学院地球环境研究所, 2015. [Li Leyi. Magnetostratigraphy and the Paleoenvironment Evolution of Paleogene Tuotuohe Basin, Tibetan Plateau[D]. Xi'an: Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, 2015.]

[34] 胡夏嵩, 陈桂琛, 周国英, 等. 青藏铁路沱沱河段路基边坡植物护坡根系力学强度试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(1): 107-113. [Hu Xiasong, Chen Guichen, Zhou Guoying, et al. A study of the mechanic strength of vegetation roots for roadbed slope protection in the Tuotuohe river region along the Qinghai-Tibet railway[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(1): 107-113.]

[35] 周扬, 徐维新, 白爱娟, 等. 青藏高原沱沱河地区动态融雪过程及其与气温关系分析[J]. 高原气象, 2017, 36(1): 24-32. [Zhou Yang, Xu Weixin, Bai Aijuan, et al. Dynamic snow-melting process and its relationship with air temperature in Tuotuohe, Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteorology, 2017, 36(1) : 24-32.]

[36] 朱海丽, 胡夏嵩, 毛小青, 等. 青藏高原黄土区护坡灌木植物根系力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊2): 3445-3452. [Zhu Haili, Hu Xiasong, Mao Xiaoqing, et al. Study on mechanical characteristics of shrub roots for slope protection in loess area of Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Suppl. 2): 3445-3452.]

[37] Yang Y, Chen L, Li N. How gauge length and loading rate influence the root tensile strength of *Betula platyphylla*[J]. Journal of Soil & Water Conservation, 2016, 71(6): 460-466.

[38] Baets S D, Poesen J, Reubens B, et al. Root tensile strength and root distribution of typical mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength[J]. Plant & Soil, 2008, 305(1-2): 207-226.

Mechanics strength test of herb roots on the earth-borrowed area of Tuotuohe River section of the Qinghai-Tibet railway

ZHOU Lin-hu[1], XU Zhi-wen[1], ZHOU Guo-ying[2], HU Xia-song[1,3],
XU Tong[1], SHEN Zi-yan[1], LIU Chang-yi[1]

(1. *Department of Geological Engineering, Qinghai University, Xining* 810016, *Qinghai, China;*
2. *Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining* 810008, *Qinghai, China;*
3. *Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of comprehensive and highly efficient utilization of Salt Lake resources, Chinese Academy of Sciences, Xining* 810008, *Qinghai, China*)

Abstract: An earth-borrowed area in the Tuotuohe river section of the Qinghai-Tibet railway was selected as the study area, and four kinds of herbs (*Puccinellia tenuiflora*, *Elymus nutans*, *Poa crymophila*, and *Puccinellia distans*) with a growth period of 10 a were selected as the test species. Single root tensile tests and single root shear tests were carried out in the laboratory respectively to evaluate the mechanical strength characteristics of the single root of four herbs systematically. The results show that (1) the descending order of the average tensile strength of the single root of four herbs in the field was *P. tenuiflora* (66.29 MPa)>*E. nutans* (50.78 MPa) >*P. crymophila* (46.11 MPa) >*P. distans* (40.62 MPa), the descending order of the average shear strength of single rootwas *P. tenuiflora* (44.37 MPa)>*E. nutans* (37.74 MPa)>*P. crymophila* (36.80 MPa)>*P. distans* (26.66 MPa), and both average tensile strength and average shear strength have a negative correlation with the root diameter in accordance with the power function. (2) According to the comparison of the single tensile force and shear force of four herbs with a growth period of 5 a and 10 a, the tensile force increased by 11.71%−62.31%, and the shear force growth rate was 26.30%−92.61%. (3) By comparing the mechanical strengths of different root diameters of the four herbs, it is concluded that the mechanical properties of the roots of *P. tenuiflora* and *E. nutans* are significantly better than those of the other two herbs and can be preferentially used as soil consolidation and slope protection plants in the study area.The results of this study can provide some reference value for the selection of dominant plants of slope protection in the Tuotuohe river section and its surrounding areas of the Qinghai-Tibet railway.

Keywords: Qinghai-Tibet railway; Tuotuohe River; earth-borrowed area; herbs; shear strength; tensile strength